

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет  
пр. Свободный, 79, Красноярск, 660041, Россия

<sup>2</sup> ОАО «Информационные спутниковые системы»  
им. акад. М. Ф. Решетнёва,  
ул. Ленина, 52, Железногорск, 662990, Россия

E-mail: dlediyaev@gmail.com; aav@nppom.ru

## ПОДДЕРЖКА МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО АНАЛИЗА В СЛОЖНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В настоящее время программные средства поддержки многокритериального анализа не ориентированы на конечного пользователя или являются узкоспециализированными решениями. Предлагается среда инструментальной поддержки, которая позволит повысить эффективность многокритериального анализа в сложных иерархических системах на уровне пользователей-прикладников независимо от предметной области.

*Ключевые слова:* инструментальные средства, принятие решений, многокритериальный анализ.

### Введение

В различных прикладных областях, таких как машиностроение, конструирование космических аппаратов, самолетов, компьютерной техники и многих других, проводится разработка и проектирование сложных иерархических систем. Такие системы, как правило, характеризуются многоуровневой структурой, которая формируется из множества подсистем, представленных различными вариантами реализации. Процесс проектирования усложняется наличием большого количества альтернативных конфигураций, из которых необходимо выбрать определенный вариант. Лицо, принимающее решение (ЛПР), сталкивается со сложной системой взаимозависимых компонентов (ресурсы, желаемые исходы или цели, лица или группы лиц и т. д.), которую нужно проанализировать. Причем чем глубже он вникнет в эту сложность, тем лучше будут его прогнозы или принимаемые решения [1]. Это в свою очередь порождает ряд проблем, связанных с формализацией и обработкой больших массивов информации. Принятие решения становится сложной задачей, успешность разрешения которой непосредственно определяет эффективность реализуемых прикладных проектов.

Процесс выбора конфигурации иерархической системы является непростой задачей, а само решение неочевидным из-за схожести параметров альтернативных вариантов и наличия множества противоречивых критериев, не поддающихся ручному анализу. Для получения сопоставляемых критериев приходится проводить расчеты по сложным формулам, учитывающим характеристики подсистем различного уровня, в результате чего формируется задача многокритериального анализа [2].

Многокритериальный анализ сложных иерархических систем требует обработки большого количества данных, что является чрезмерно ресурсоемким процессом. В основном это обусловлено размерами структуры разрабатываемой системы, в которой каждая подсистема представлена собственным набором альтернативных вариантов, параметров и критериев их оценки. Детальная проработка этих подсистем обособленно друг от друга в итоге может не дать желаемого решения. При формировании окончательного решения ЛПР верхнего уровня, как правило, руководствуется показателями целостной системы, поэтому делает осознанный выбор конфигурации, в которую входят не только лучшие представители каждой из подсистем. В результате общая задача многокритериального анализа усложняется необходимостью дополнительной проработки получаемой структуры.

## Обзор существующих систем анализа и принятия решений

В настоящее время решение задачи многокритериального анализа в различных прикладных областях поддерживается инструментальными средствами, которые условно могут быть разделены на три основные группы:

- специализированные системы, обеспечивающие поддержку процесса принятия решений при разработке конкретных технических систем;
- универсальные пакеты и инструменты, предназначенные для анализа разнообразных моделей и систем, содержащие также средства для многокритериального анализа;
- проблемно-ориентированные системы анализа и принятия решений.

Специализированные системы, обеспечивающие поддержку процесса принятия решений при разработке конкретных систем, – это программные средства, ориентированные на анализ в строго заданных условиях. Их главным недостатком является невозможность настройки на изменяемые условия задачи и прикладной области, плюс при работе со сложными иерархическими системами может сформироваться ситуация, в которой отдельные элементы разработанного программного обеспечения будут дублировать функции друг друга. Положительное свойство заключается в том, что такая программная система эффективна на ранней стадии создания инструмента и выступает прототипом для разработки более универсального средства, ориентированного на группу схожих задач и обладающего механизмами настройки под прикладную область.

Примером может служить «Система поддержки принятия решений для страхования» [3], разработанная для решения задачи оценки риска страхуемого объекта. Это большая и сложная программная система, построенная из ядра и относительно обособленных друг от друга элементов, присоединяемых к нему при помощи так называемой «интеграционной шины». Ядро представляет собой хранилище данных, сформированное на базе серверной платформы, к которой подключаются терминалы администратора системы и пользователей. Архитектура среды жестко ориентирована на решаемую задачу и прикладную область, что не позволяет эффективно использовать ее в других областях.

Второй пример – «Комплексная система поддержки принятия решений в Новороссийском порту»<sup>1</sup>, предназначенная для поддержки тактического и оперативного управления портом. Архитектура системы построена таким образом, что центральное место занимает хранилище данных, разработанное по технологии геоинформационных систем, что позволяет одновременно хранить хорошо и слабо формализуемую информацию. К нему, в свою очередь, подключаются автоматизированные рабочие места (АРМ) представителей менеджмента компании. Внутренние и внешние информационные потоки, а также пользовательский интерфейс АРМов построен таким образом, что представленная система может быть эффективно использована только для работы с прикладным объектом, на который она ориентирована.

Применение представленных инструментов в любой другой прикладной области приводит к полной перестройке системы или «подгонке» целевого объекта под индивидуальные особенности инструмента. В первом случае требуются дополнительные затраты ресурсов, сопоставимые с разработкой нового средства, а во втором происходит ухудшение получаемых результатов.

Универсальные пакеты и инструменты, предназначенные для анализа разнообразных моделей и систем, содержащие также средства для многокритериального анализа, представляют собой программные средства, разработанные специально для реализации сложных математических расчетов и моделирования в процессе решения различных задач. Архитектура таких информационных систем основана на многофункциональном внутреннем языке, включающем в себя набор базовых конструкций, предназначенных для решения типовых задач, и мощные средства их синтеза в обобщающую структуру. В общем виде это совокупность инструментальных средств, реализующих определенные математические методы, с общими алгоритмами их синтеза в единый объект.

Положительным качеством описанных средств является возможность разработки на их основе систем, настраиваемых под условия решаемой задачи и особенности прикладной

<sup>1</sup> См.: [http://www.dataplus.ru/arcrev/number\\_24/13\\_novoros.htm](http://www.dataplus.ru/arcrev/number_24/13_novoros.htm).

области. Это достигается за счет гибкой архитектуры с возможностью подключения новых модулей к уже синтезированной системе. Главный недостаток этих средств в ориентированности их интерфейса на пользователей-математиков и, как следствие, невозможность эффективного применения пользователями-прикладниками. В результате появляется необходимость привлечения специалистов-математиков к процессу решения прикладной задачи, что порождает проблему их обучения особенностям предметной области. Обратная ситуация по повышению уровня математических знаний у пользователей-прикладников также требует затрат на повышение квалификации. В итоге в решении задачи задействовано большое количество людей, не связанных непосредственно с производственным процессом, что приводит к трате дополнительных материальных ресурсов и увеличению общего времени его реализации.

Широкое распространение получили такие программные пакеты, как MatLab [4; 5], MatCad [6], Mathematica [7], Statistica [8; 9] и др. В общем виде эти пакеты представляют собой совокупность инструментальных средств поддержки вычислений, в той или иной мере ориентированных на определенную специфику математических расчетов. Все они характеризуются сложным внутренним языком, рассчитанным на квалифицированного специалиста. Пользователи, не обладающие достаточным знанием математики и интегрированного языка, не могут эффективно работать с ними. Это универсальные среды, но рассчитаны они на узкую группу специалистов.

Проблемно-ориентированные системы анализа и принятия решений – это информационные системы, разработанные для поддержки решения класса задач, порождаемых определенной проблемой или совокупностью схожих проблем. Инструментальные средства разрабатываются таким образом, чтобы одновременно ориентироваться на решение некоторой группы типовых задач и обеспечивать подстройку своих подсистем под индивидуальные особенности каждой проблемной ситуации и прикладной области.

Программные системы характеризуются такими положительными чертами, как гибкая архитектура, модульность реализации, возможность подстройки под индивидуальные особенности решаемой задачи и ориентированный на конечного пользователя интерфейс. При этом они обладают одним главным минусом: эти инструментальные средства сами являются большими и сложными системами, которые требуют затрат значительного количества ресурсов на разработку и последующее сопровождение. Ввиду своей широкой специализации, инструменты не ориентированы специальным образом на поддержку многокритериального анализа, а следовательно, требуют дополнительной настройки, сравнимой по затратам с разработкой нового программного продукта. Применение информационных систем этой группы специально для поддержки многокритериального анализа не является целесообразным по причине их чрезмерной ресурсоемкости.

Характерным представителем средств этой группы является класс ERP-систем [10]. Примером конкретной реализации может служить аналитический комплекс «Прогноз»<sup>2</sup>. Это интегрированная платформа для создания транзакционных и информационно-аналитических систем, а также систем поддержки принятия решений. Комплекс объединяет современные технологии хранилищ данных, оперативного анализа данных (OLAP), средства имитационного и эконометрического моделирования, плюс возможности WEB-доступа и СОМ-интерфейса.

Аналитический комплекс «Прогноз» позволяет синтезировать информационные системы для решения задач оперативного и тактического управления на уровне предприятия, корпорации или региона. Конечный инструмент представляет собой большую систему со сложной архитектурой, что делает нецелесообразным ее использование при решении отдельных задач в рамках локальных проблем или технологического процесса. Несмотря на заложенную возможность подключения новых библиотек, требуется значительное количество ресурсов для внесения корректировок в отдельные подсистемы. «Прогноз» является метасистемой по отношению к конечным информационным системам, обладает сложной структурой, требует к ресурсам.

<sup>2</sup> См.: [http://www.prognoz.ru/ru/products\\_akprognoz.php](http://www.prognoz.ru/ru/products_akprognoz.php).

Целевой анализ решений, используемых для поддержки многокритериального анализа, показывает, что при разработке сложных иерархических систем специалистом, незнакомым как с особенностями методов, так и с особенностями их реализаций, необходимо применять инструменты, обладающие удобным пользовательским интерфейсом и возможностью настройки процесса анализа и принятия решений на прикладную задачу. Наиболее полно на пользователя-прикладника и особенности решаемой задачи ориентирована группа специализированных систем. Однако разработка подобных средств для решения разнообразных прикладных задач может оказаться весьма трудоемким и затратным процессом. Применение инструментов из группы универсальных пакетов требует наличия у пользователя специальных знаний, что ведет к дополнительным трудностям по освоению ими инструментов или привлечению специалистов, знакомых с методами анализа, но не знакомых с предметной областью. Во многих случаях привлечение дополнительных людей неоправданно по ряду причин. Проблемно-ориентированные системы анализа и принятия решения также не могут быть эффективно использованы для многокритериального анализа, так как являются большими, сложными и ресурсоемкими системами.

В итоге можно сделать вывод, что ни одно из существующих инструментальных средств не может быть одинаково эффективно использовано для поддержки решения задачи многокритериального анализа при разработке сложных иерархических систем в различных прикладных областях. Выходом из создавшегося положения является создание проблемно-ориентированного средства принятия решений, реализующего необходимые методы анализа данных и имеющего оболочку, обеспечивающую настройку на требуемую предметную область и задачу. Создание такой информационной системы позволит специалистам-прикладникам использовать существующие методы многокритериального анализа для эффективного решения своих задач за счет предварительной подстройки системы.

### **Поддержка многокритериального анализа при разработке сложных иерархических систем**

Разработка сложной иерархической системы подразумевает подход, при котором формирующие ее элементы связаны отношением состава в иерархическую структуру. Иерархия в данном случае есть определенный тип системы, основанный на предположении, что элементы системы могут группироваться в несвязанные множества. Элементы каждой группы находятся под влиянием элементов некоторой вполне определенной группы и, в свою очередь, оказывают влияние на элементы другой группы [1].

Строится комплексная задача многокритериального анализа со сложной иерархической структурой подзадач (рис. 1). Ее суть заключается в том, что ЛПР необходимо сформировать определенную конфигурацию системы из множества доступных вариантов реализаций отдельных подсистем. Каждая подсистема, независимо от уровня иерархии, представлена собственным набором критериев и альтернатив, что порождает типовую задачу многокритериального анализа. Результатом решения комплексной задачи является конфигурация технической системы с однозначно определенными элементами или группа конфигураций, в которой общее количество альтернативных вариантов позволяет ЛПР принять окончательное решение без использования специальных методик и подходов.

Решение комплексной задачи разделяется на множество подзадач, в каждой из которых рассматривается только один типовой анализ. При таком подходе глобальная задача решается посредством последовательности действий по разрешению соответствующих ей подзадач, в направлении снизу вверх. В первую очередь производятся вычисления для подсистемы, расположенной на самом нижнем уровне декомпозиции, затем полученный результат передается на уровень выше, где снова решается задача многокритериального анализа, но уже для вышестоящих элементов, и так далее до самой вершины.

Для решения комплексной задачи многокритериального анализа предлагается проблемно-ориентированная среда инструментальной поддержки пользователя, которая должна:

- быть настраиваемым инструментом, одинаково эффективно используемым в различных прикладных областях;

- обладать гибкой архитектурой, позволяющей на этапе настройки менять конфигурацию отдельных подсистем для обеспечения адаптации под прикладную область и требования пользователя;
- иметь доступный и дружелюбный интерфейс, ориентированный на конечного пользователя, который не обладает специальными знаниями, выходящими за пределы его предметной области;
- иметь возможность расширения функциональности за счет подключения новых модулей, реализующих алгоритмы поддержки многокритериального анализа.

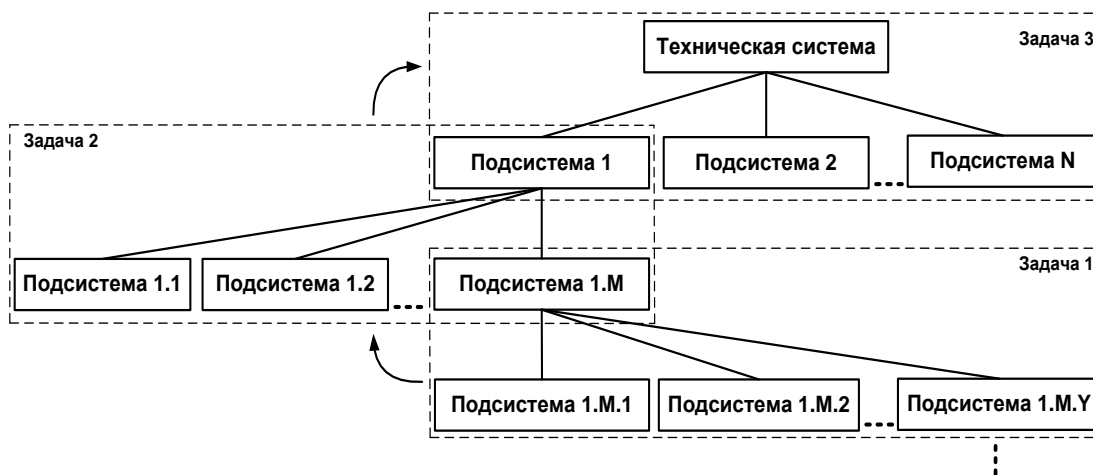


Рис. 1. Общий вид комплексной задачи многокритериального анализа

### Архитектура среды инструментальной поддержки

Общая архитектура проблемно-ориентированной среды инструментальной поддержки пользователя в задачах многокритериального анализа разработана как совокупность трех основных уровней (рис. 2).



Рис. 2. Общая архитектура среды инструментальной поддержки

Такой подход позволяет реализовать возможность подстройки среды под прикладную область с целью обеспечения формирования адекватной модели разрабатываемой иерархической системы (подсистемы) и ориентированности интерфейса на конечного пользователя. Учитывается также необходимость эволюционного расширения алгоритмической поддержки многокритериального анализа за счет добавления в среду новых модулей. Помимо этого, выделение относительно обособленной функциональности информационной системы в отдельный модуль позволяет в дальнейшем при необходимости перестраивать только эту обособленную часть, а не всю систему полностью.

Ядро представляет собой подсистему программной системы, которая производит все технические расчеты и вычисления, выполняемые в процессе многокритериального анализа, тем самым обеспечивая алгоритмическую и техническую поддержку решения задачи. Состав ядра формируется из двух основных элементов (рис. 3).

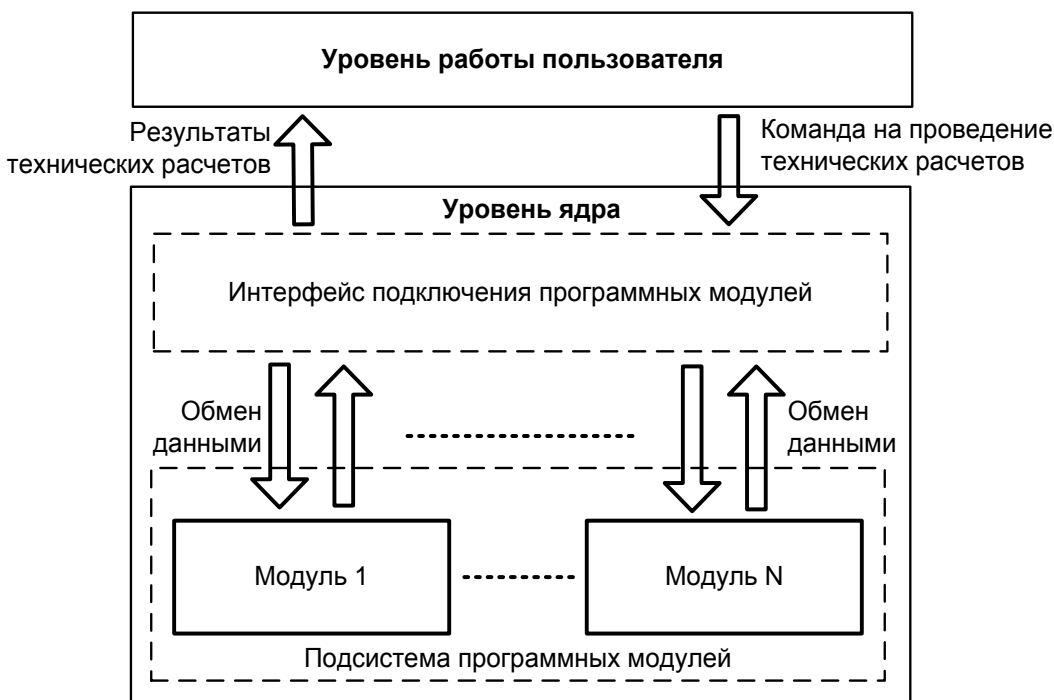


Рис. 3. Структура уровня ядра среды инструментальной поддержки

Интерфейс подключения программных модулей представляет собой совокупность средств для интеграции в ядро среды (а также исключения из ядра) программно реализованных инструментов поддержки многокритериального анализа. Интерфейс обеспечивает относительно простое и эффективное управление функциональностью ядра за счет добавления и исключения модулей с реализованными в них методами и методиками поддержки математических расчетов и вычислений. После того, как новый модуль подключен к ядру, интерфейс обеспечивает передачу управляющих команд и данных, необходимых для инициирования его работы, а также осуществляет выдачу информации обратной связи (результаты вычислений, технические сообщения), отображающей работу модуля.

Подсистема программных модулей представляет собой общую совокупность программно реализованных инструментов поддержки многокритериального анализа, подключенных к ядру среды. Подсистема обеспечивает поддержку математических вычислений и расчетов в процессе решения задачи. Каждый отдельный модуль – это программный продукт, реализующий некоторый метод или методику поддержки многокритериального анализа.

Уровень работы пользователя представляет собой совокупность инструментальных средств, обеспечивающих взаимодействие пользователя с программной системой (рис. 4). Эта подсистема среды организует доступ пользователя к алгоритмам поддержки многокритериального анализа, реализованным на уровне ядра, а также предоставляет ему интуитивно

понятный инструментарий для формирования необходимых команд и верной интерпретации результатов вычислений. Помимо этого, уровень работы пользователя построен таким образом, чтобы обеспечить его эффективную настройку на прикладную область, в которой разрабатывается иерархическая система.

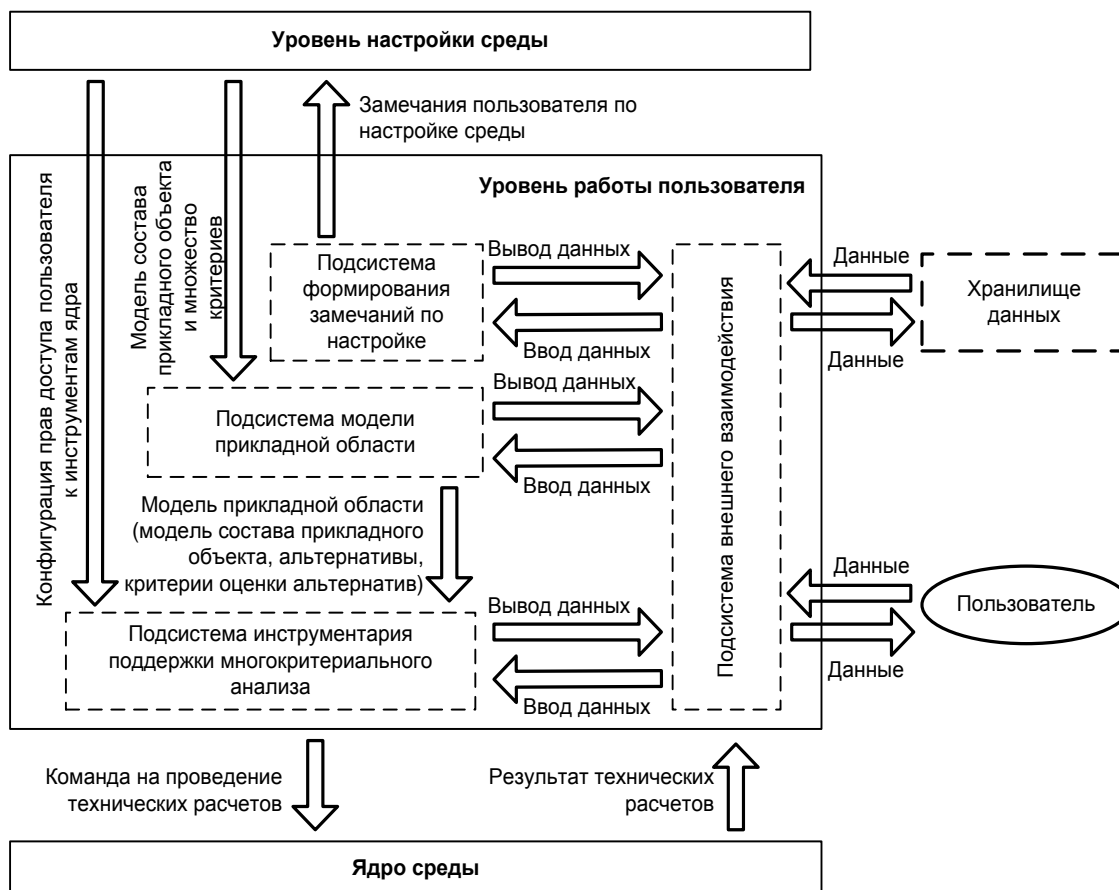


Рис. 4. Структура уровня работы пользователя среды инструментальной поддержки

Назначением подсистемы модели прикладной области является организация доступа пользователя к модели прикладного объекта, сформированной администратором на этапе настройки среды, и расширение ее до модели прикладной области за счет добавления альтернатив и выбора критериев их оценки. Пользователю предоставляется модель состава прикладного объекта с заданными свойствами каждого подобъекта и группы критериев оценки альтернатив. В рамках модели он привязывает отдельным подобъектам множества альтернативных вариантов, рассматриваемых в процессе решения задачи многокритериального анализа, и критерии их оценки, которые будут использованы в технических расчетах.

Подсистема инструментария поддержки многокритериального анализа обеспечивает доступ пользователя к инструментальным модулям, реализованным в ядре среды. Пользователь выбирает инструменты, которые будут использованы в процессе технических расчетов, и отдает им команды, инициирующие их работу. Каждая команда содержит: инструмент-адресат; набор необходимых для его корректной работы параметров; подобъект прикладного объекта, для которого решается задача многокритериального анализа; множество альтернативных вариантов и критерии их оценки.

Подсистема формирования замечаний по настройке предназначена для организации взаимодействия пользователя и администратора с целью обеспечения максимально эффективной подстройки среды инструментальной поддержки под решаемую задачу и предметную область. В процессе работы пользователь может сформировать рекомендации и замечания, которые будут переданы на уровень настройки.

Подсистема внешнего взаимодействия представляет собой интерфейс, назначением которого является предоставление пользователю доступа к инструментам среды для организации его эффективной работы. В общем виде интерфейс реализует два основных потока данных – в среду и из среды. При этом в контексте разрабатываемой среды рассматривается две методики реализации этих потоков (непосредственно и опосредованно). При непосредственном вводе и выводе происходит организация двух постоянных информационных каналов (в среду и из среды), по которым осуществляется передача данных по мере появления. Это позволяет пользователю работать со средой в режиме реального времени, в частности вручную вводить информацию и управляющие команды, а также наблюдать за обратной связью. В опосредованном подходе строится временный канал для передачи заранее сформированного массива данных, который используется для загрузки / выгрузки некоторого объема заранее подготовленной информации.

Уровень настройки представляет собой совокупность средств и методов по настройке пользовательского инструментария под условия задачи и прикладную область (рис. 5). В частности, формируется из инструментов административного управления доступом пользователя к ядру и конфигурирования пользовательского интерфейса.

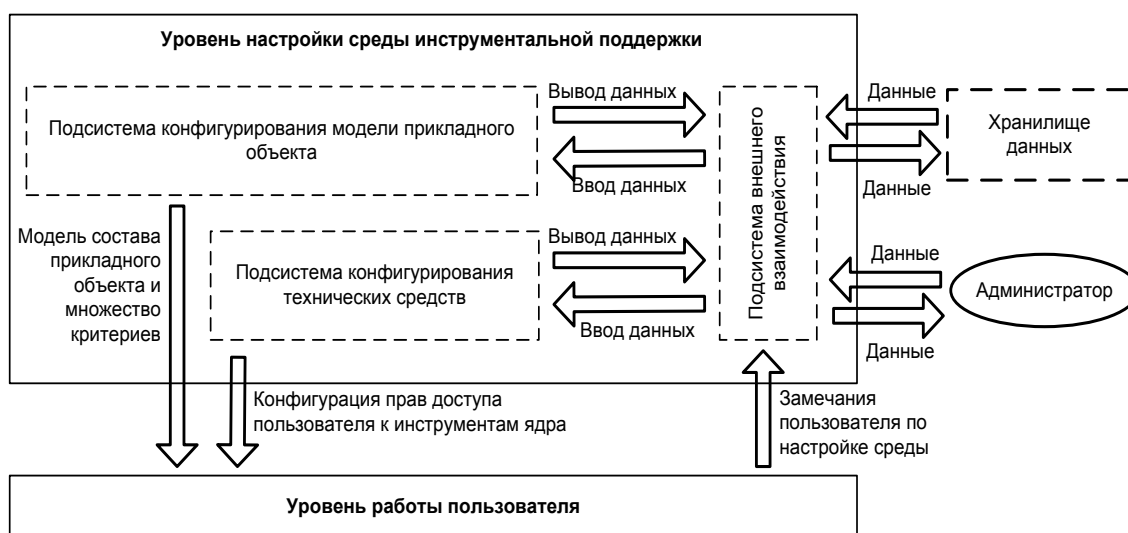


Рис. 5. Структура уровня настройки среды инструментальной поддержки

Подсистема конфигурирования модели прикладного объекта обеспечивает формирование модели состава разрабатываемой иерархической системы или ее отдельной подсистемы. Администратор строит модель, задает свойства ее элементов и формирует множество критериев оценки. Модель состава представляет собой двухуровневую иерархическую структуру, в которую включаются все элементы разрабатываемой системы, для которых необходимо решить задачу многокритериального анализа.

Используя построенную модель состава, администратор каждому элементу присваивает совокупность свойств, которые выступают в качестве параметров сравнения альтернатив при многокритериальном анализе. Администратор вводит только их названия, тем самым задавая формат, в соответствии с которым пользователь должен добавить альтернативные варианты для каждого из элементов модели.

Также в этой подсистеме администратор для каждого элемента модели задает множество критериев оценки альтернатив. В процессе многокритериального анализа пользователь может использовать только критерии, заданные администратором. В общем виде критерий представляет собой правило, в соответствии с которым оценивается конфигурация разрабатываемой системы, в частности, свойства ее подсистем или отдельной подсистемы. При условии работы с хорошо формализованными данными в качестве критерия выступает некоторая математическая функция  $f = \{(x_1, x_2, \dots, x_n, y)\}$ , которая позволяет получить численную оценку одного или более элементов, представленных некоторыми альтернативными вариан-



тами. Функция ( $f$ ) задает зависимость между областью определения аргументов ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), отображающих свойства элементов, и областью значений их оценки ( $y$ ).

С позиции взаимоотношений элементов иерархической системы критерий задает определенный вид связи одного или более элементов нижнего уровня с элементом верхнего. Выделяется четыре основных вида критериев:

- объекту привязывается одно свойство одного подобъекта;
- объекту привязывается несколько свойств одного подобъекта;
- объекту привязывается по одному свойству от нескольких подобъектов;
- объекту одновременно может быть привязано одно свойство одного подобъекта и несколько свойств другого подобъекта.

Назначением подсистемы конфигурирования технических средств является регулирование доступа пользователя к инструментам поддержки многокритериального анализа, реализованным на уровне ядра. Администратор определяет, какие инструменты будут доступны пользователю для решения задачи. Помимо прав доступа в рамках этой подсистемы задаются рекомендации по управлению техническими расчетами в форме краткого описания синтаксиса команд управления инструментами и правила ввода параметров.

Подсистема внешнего взаимодействия представляет собой интерфейс административной части среды. Ее назначением является предоставление администратору доступа к инструментам настройки среды инструментальной поддержки.

### Заключение

В статье предложена общая архитектура среды инструментальной поддержки, которая позволяет избежать недостатков описанных средств, при этом аккумулирует главные достоинства систем каждой группы. Трехуровневая структура с четким разделением функций позволяет настраивать среду инструментальной поддержки на условия решаемой задачи и особенности прикладной области. Причем процесс настройки остается прозрачным для конечного пользователя и не требует от него наличия специальных знаний, выходящих за пределы предметной области. Особая конструкция ядра среды позволяет регулировать инструменты, доступные пользователю, путем добавления или удаления соответствующих программных модулей.

Применение представленной среды позволит повысить эффективность решения задач многокритериального анализа на уровне пользователей-прикладников независимо от предметной области. В завершение стоит отметить, что в настоящее время в соответствии с разработанной архитектурой создан прототип программной системы для поддержки многокритериального анализа при проектировании космических аппаратов.

### Список литературы

1. Саати Т. Л. Принятие решений: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.
2. Горский П. Введение в дисциплину «Поддержка принятия решений». URL: [http://www.cfin.ru/management/decision\\_science.shtml?printversion](http://www.cfin.ru/management/decision_science.shtml?printversion).
3. Шахраманьян А. М., Мамедов Э. Э. Система поддержки принятия решений для страхования. URL: [http://www.dataplus.ru/arcrev/number\\_40/14\\_strah.html](http://www.dataplus.ru/arcrev/number_40/14_strah.html).
4. Потемкин В. Г. Введение в Matlab. URL: [http://www.exponenta.ru/soft/matlab/potemkin/book/matlab/chapter0/0\\_1.asp](http://www.exponenta.ru/soft/matlab/potemkin/book/matlab/chapter0/0_1.asp).
5. Веремей Е. И. Система MATLAB в учебном процессе для специалистов по теории управления и информационным технологиям. URL: <http://2005.edu-it.ru/docs/4/4-07.Veremej.doc>.
6. Шушкевич Г. Ч., Шушкевич С. В. Введение в MathCAD 2000: Учеб. пособие. Гродно: ГрГУ, 2001. 138 с.
7. Большакова И. В., Мастяница В. С. Экономико-математические расчеты в системе MATHMATICA: Учеб. пособие для студентов экон. фак-та БГУ // Минск: БГУ, 2005. 128 с.
8. Лазарева Т. Я., Абалуев Р. Н. Введение в систему STATISTICA: Метод. указания. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. 32 с.

9. Боровиков В. П. Популярное введение в программу Statistica. М.: Компьютер-Пресс, 1998.
10. APICS dictionary: 7th ed. / ed. J. F. Cox. Falls Church(Va): [s. n.], 1992. 54 p.

*Материал поступил в редколлегию 14.09.2009*

**A. I. Legalov, D. N. Ledjajev, A. V. Ankudinov**

**SUPPORT OF MULTICRITERION ANALYSIS IN COMPLEX HIERARCHICAL SYSTEMS**

Nowadays program solutions for multicriterion analysis are not adapted for end-user or they are highly tailored information systems. It proposes environment that can increase effectiveness of multicriterion analyzing in complex hierarchical systems at user level and independently of application area.

*Keywords:* software tools, decision accepting, multicriterion analyzing.